

Аналіз та вибір покриттів для підвищення довговічності деталей дифузійних апаратів цукрових заводів

Ю. Г. Сухенко, Н. А. Медведєва, В. Ю. Сухенко

Досліджено електрохімічні властивості зносо- і корозійностійких покриттів та їх вплив на процеси тертя та зношування деталей дифузійних апаратів цукрових заводів. Встановлено вплив температури і складу технологічного середовища, електрохімічних характеристик захисних покриттів на опір деталей спрацюванню в умовах корозійно-механічного зношування. Визначено основні закономірності зношування та корозії деталей в технологічних середовищах

Ключові слова: захисні покриття, дифузійний сік, електрохімічні властивості, корозійно-механічне зношування

1. Вступ

Значна частина металевих деталей обладнання цукрових заводів піддається дії агресивних технологічних рідин, що спричиняє інтенсивне корозійно-механічне спрацювання. У ряді випадків інтенсивність зношування настільки велика, що деталі обладнання не витримують і сезону роботи заводу. Це пояснюється особливо важкими умовами експлуатації безпосередньо в агресивних середовищах, зокрема у дифузійному соку, мийних і дезінфекуючих розчинах тощо.

Тертя металів в активних рідких середовищах має специфічні особливості, які полягають у тому, що на процес деформації і руйнування спряжених поверхонь суттєво впливають електрохімічні чинники [1]. Трибокорозія охоплює науку поверхневих перетворень та поєднує в собі механічні та хімічні взаємодії тіла, контр-тіла, міжфазного середовища та середовища, включаючи тертя, змащення, зношування та трибологічно активовані хімічні та електрохімічні реакції [2].

При терті в агресивних середовищах корозійні процеси значно прискорюються. Кислі, лужні і нейтральні технологічні середовища – електроліти різняться за впливом на процес корозійно-механічного зношування деталей. В кислих середовищах переважає анодне розчинення металів та покриттів [3]. Лужні середовища можуть утворювати на поверхнях металів захисні плівки і зменшувати роль корозійного чинника в процесі зношування [4]. Нейтральні середовища – електроліти можуть знижувати корозійну стійкість деталей (наприклад, слабкі розчини кухонної солі) [2, 5]. При надлишку у розчинах кисню на поверхнях тертя деталей можуть утворюватись захисні плівки. Такі плівки захищають деталі від корозійно-механічного зношування [6]. Швидкість корозійно-механічного зношування металевих покриттів визначається двома факторами – механічним зношуванням і анодним розчиненням поверхонь. У багатьох

випадках доля розчинення поверхонь металевих деталей внаслідок корозійних процесів перевершує долю механічного зношування. Це характерно для деталей обладнання, які експлуатуються в слабко кислих середовищах цукрових заводів [5] і м'ясопереробних підприємств [6]. Навіть іржостійкі сталі піддаються міжкристалічній корозії при терті в кислих середовищах [7].

Існує багато технологічних методів впливу і керування складом, структурою і властивостями поверхневих шарів деталей. Проте впровадження таких засобів у виробництво гальмується відсутністю науково обґрунтованих рекомендацій щодо раціонального вибору матеріалів та способів зміцнення поверхонь деталей в залежності від виду зношування, його характеру, інтенсивності, характеристик робочих середовищ тощо.

При виготовленні і ремонті деталей технологічного обладнання цукрових заводів застосовують різні матеріали і захисні покриття.

Дані про зносо- та корозійну стійкість технологічного обладнання цукрових заводів, отримані при їх обстеженні, свідчать про те, що щорічно найбільша кількість матеріальних затрат приходить на ремонт випарних апаратів і дифузійних установок.

Одним з основних технологічних середовищ цукрового виробництва є дифузійний сік. Це є багатокомпонентний розчин, що містить поряд з 12-15 відсотками цукрози ряд сполук, які знаходяться в розчиненому стані і частину нерозчинних речовин. Наявність в його складі органічних кислот (щавлевої, лимонної, янтарної тощо) надає йому слабко кислої реакції (рН 6,1-6,6). Поряд з іншими домішками він містить ряд поверхнево-активних речовин (ПАР) – сапонін, білки, пектини. Склад дифузійного соку залежить від того, в якому регіоні вирощена сировина. Розмаїття складу і властивостей дифузійного соку визначає особливості і складність вивчення процесів корозійно-механічного зношування (КМЗ) поверхонь деталей дифузійних апаратів і обумовлює труднощі у розробці ефективних рекомендацій з підвищення довговічності.

Найменш довговічними деталями дифузійних апаратів є підшипники ковзання і шнеки транспортної системи, які потребують захисту від корозійно-механічного зношування.

Одним з перспективних способів захисту цих деталей від спрацювання є нанесення самофлюсованих плазмових покриттів. Такі покриття здатні захищати деталі від зносу і корозії. Разом з тим електрохімічні і триботехнічні властивості таких покриттів у дифузійному соку цукрових буряків не визначені. Дослідження цих чинників є актуальною задачею.

2. Аналіз літературних даних і постановка проблеми

Дослідження корозійної стійкості металів в дифузійному соку [1] дозволили встановити, що кращими для виготовлення деталей дифузійних апаратів є нержавіючі сталі аустенітного класу. Але такі сталі схильні до міжкристалітної корозії [8, 9] і є гостродефіцитними, дорогими і не технологічними.

Вибір матеріалів для деталей технологічного обладнання цукрових виробництв ускладнений ще і через відсутність єдиної методики дослідження процесу КМЗ, та інколи через неможливість порівняння результатів, отриманих різ-

ними дослідниками. Авторы работы [10] установили, что коррозированный фактор определяет интенсивность износа только при малых давлениях.

Останнім часом в дослідженнях корозійно-механічного зношування деталей обладнання враховуються електрохімічні характеристики технологічного середовища, металів і сплавів [9]. Автор [11] розглядає трибокорозію як взаємодію між хімічними, електрохімічними та механічними процесами, що призводить до деградації матеріалів, занурених у корозійне середовище. Модифікація поверхневих характеристик виникає внаслідок комбінованого періодичного механічного видалення поверхневої плівки під час взаємодії пар тертя та подальшого (електро) хімічного повторного зростання цієї поверхневої плівки [12]. Деякі дослідники прогнозують рівень зносостійкості за електродними потенціалами конструкційних матеріалів у середовищах – електролітах. Інколи опір металів корозійному руйнуванню оцінюють за струмами корозії [13]. Безумовно, електродні потенціали поверхонь деталей у середовищі і виникаючі струми електрохімічної корозії вирішально впливають на процеси утворення пасивуючих плівок на поверхнях деталей та інтенсивність зношування [14]. Загальних рекомендацій для захисту деталей від спрацювання в будь-якому середовищі не існує. Опір матеріалів корозійно-механічному зношуванню можна оцінити лише з урахуванням електрохімічних характеристик матеріалів в конкретному середовищі за спеціальною методикою [15].

Тому вбачалося перспективним повернення до проблеми підвищення довговічності деталей дифузійних апаратів на підґрунті сучасного уявлення про процеси корозійно-механічного зношування.

3. Мета та завдання досліджень

Метою роботи є підвищення довговічності деталей дифузійних апаратів цукрових заводів з урахуванням електрохімічних властивостей матеріалів і технологічного середовища.

Для досягнення поставленої мети вирішувалися наступні задачі:

- встановити вплив дифузійного соку, його температури, концентрації в ньому цукрози, електрохімічних властивостей поверхонь деталей дифузійних апаратів на процеси тертя і зношування;
- визначити корозійну стійкість та триботехнічні характеристики досліджуваних покриттів в дифузійному соку;
- вибрати перспективні плазмові покриття, які забезпечать високий опір спрацюванню деталей дифузійних апаратів.

4. Матеріали і методи досліджень

4. 1. Досліджувані матеріали та обладнання, що використовувались в експерименті

Спираючись на опрацьовані літературні джерела [4, 7–10], для підвищення довговічності деталей дифузійних апаратів були обрані та випробувані плазмові покриття з порошкових сплавів. Порошки сплавів ПН85Ю15, ПН55Т45, ПРН70ХІ7С4Р4 вироблені ПАТ «Тулачермет» (Росія). Склад та властивості сплавів наведено у табл. 1.

Досліджувалась корозійна стійкість вибраних покриттів у водному розчині 150 г/л цукрози, 20 г/л Na_2HPO_4 , 5 г/л лимонної кислоти [1, 5]. Такий розчин моделював дифузійний сік з цукрових буряків. Кислотність розчину контролювалася за допомогою іонметра універсального ЕВ-74. Буферна ємність розчину дозволяла підтримувати рН середовища в межах $\pm 0,2$ рН протягом усього експерименту.

Корозійна стійкість досліджуваних покриттів визначалась шляхом зняття поляризаційних потенціодинамічних кривих в статиці і при перемішуванні в електрохімічній склянці з використанням потенціостата марки П-5827М [15].

Таблиця 1

Склад та властивості порошкових сплавів

№	Покриття	Масові долі компонентів, %	Фракція, мкм	Твердість покриття, HRC
1	ПН85Ю15	85 Ni, 15 Al, 0,07 C, 0,2 Fe	40–100	30–40
2	ПН55Т45	55 Ni, 45 Ti, 0,07 C, 0,2 Fe	40–100	55–60
3	ПР-Н70ХІ7С4Р4	70 Ni, 17 Cr, 4,1 Si, 3,6 В, 1,0 C, >5,0 Fe	63–100	55–59

Для визначення зносостійкості матеріалів при терті в дифузійному соку цукрового виробництва використали машини тертя СМЦ-2, а також спеціальні установки. Електрохімічні дослідження проводили на установці (рис. 1), що дозволяє вимірювати потенціали поверхонь тертя і струми корозії.

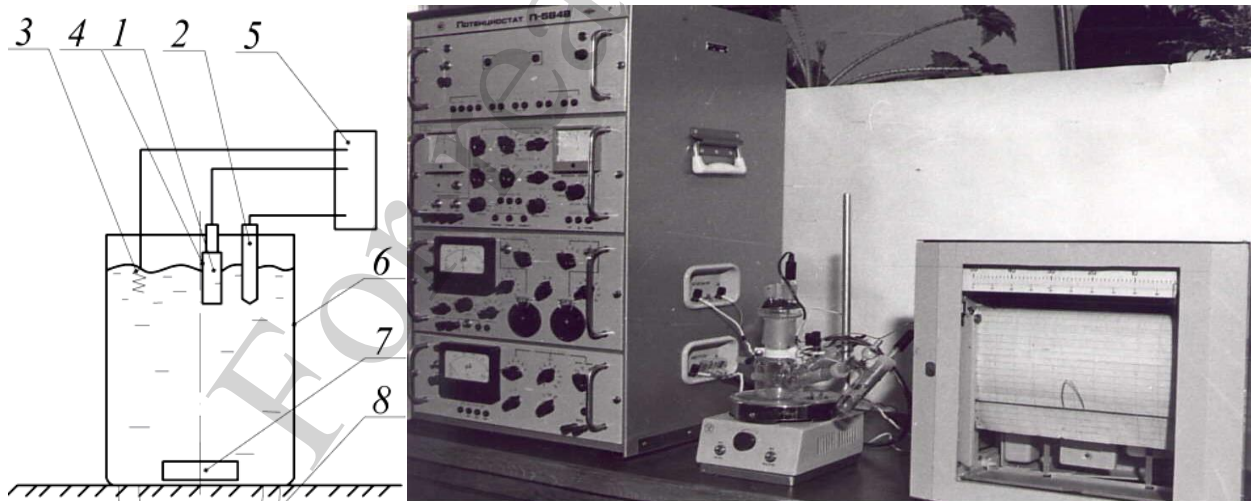


Рис. 1. Схема та загальний вигляд установки для вимірювання електродних потенціалів і отримання поляризаційних кривих в технологічних середовищах:

- 1 – зразок з покриттям; 2 – електрод порівняння; 3 – допоміжний електрод;
4 – шар ізоляційного лаку; 5 – потенціостат П5827М; 6 – скляний стакан для середовища; 7,8 – магнітний змішувач

Випробування на спрацювання проводили у технологічних середовищах на пристрої торцевого тертя (рис. 2). Зачищення поверхні покриття для зняття пасивуючих плівок здійснювали абразивним кругом 24A25HSM16K5Б.

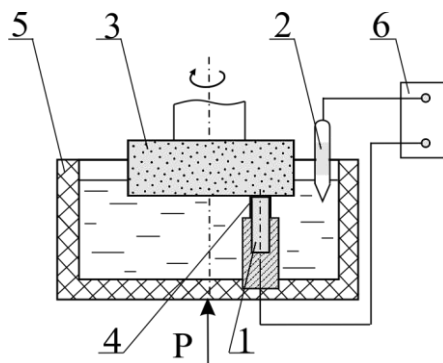


Рис. 2. Схема установки торцевого тертя: 1 – зразок; 2 – електрод порівняння; 3 – контролі; 4 – шар захисного лаку; 5 – пластмасовий корпус; 6 – потенціостат

Дослідження зносостійкості вибраних покриттів також проводилися в парах тертя з чавуном СЧ15 і бронзою БрОЦС–5–5–5, які використовують в опорах ковзання дифузійних апаратів. Тертя здійснювалося за схемою торцевого тертя, при швидкостях ковзання 0,15; 0,35; 0,74 м/с і тиску на фрикційному контакті 1, 2 і 3 Н/м² (рис.3).

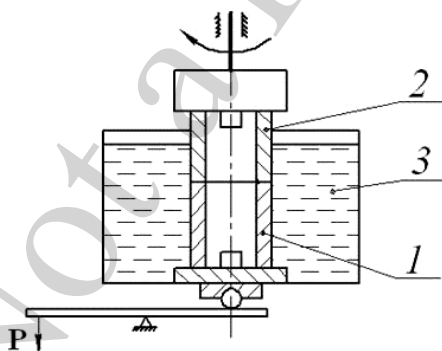


Рис. 3. Схема випробувань на тертя та зношування: 1 – зразок; 2 – контроль; 3 – технологічне середовище

Розроблені і застосовані експериментальні установки дали можливість проводити дослідження в різних середовищах.

4. 2. Методика дослідження електрохімічних властивостей захисних покриттів

Для дослідження електрохімічних процесів застосували гальваностатичний метод, оснований на знятті поляризаційних кривих в електрохімічній склянці [5, 6, 15]. Потенціостатичні дослідження проводили на установці, схема і загальний вигляд якої подані на рис. 1.

Електрохімічні вимірювання виконували за трьохелектродною схемою, яка включає досліджуваний зразок 1, бокова поверхня якого ізолювана захисним лаком, електрод порівняння 2 та допоміжний платиновий електрод 3 [15]. За електрод порівняння був прийнятий стандартний хлорсрібний електрод ЕВЛ-ІМІ. Через зразок пропускали постійний поляризаційний струм і фіксували потенціал, як його функцію. Дослідження вели при кімнатній температурі протягом 720–1140 год.

Стан поверхневих шарів металу в технологічному середовищі характеризували величиною електродного потенціалу. Скачок потенціалу між металом і розчином спостерігається при утворенні подвійного електричного шару і плівок на поверхні металу [9, 15].

Після перевірки працездатності електричної схеми приладу вимірювали вольтметром потенціостата стандартний потенціал металевого зразка. Потім подавали на досліджуваний зразок струм до появи на ньому пухирців водню і записували потенціал виділення водню на поверхні. Включали реєструючий прилад і знімали поляризаційну криву електрода.

Зміщуючи потенціал в позитивну область від стаціонарного потенціалу досліджуваного електрода (зразка), отримували анодну поляризаційну криву, а в негативну – катодну поляризаційну криву. Форма цих кривих і характер-залежності від різних параметрів дають відомості про природу даного електродного процесу.

Після зняття кривої зразок відключали і промивали. Потенціодинамічні поляризаційні криві отримували з однаковою швидкістю розгортання потенціалу 0,5 МВ/с. Залежності густини струму поляризації від електродного потенціалу ϕ будували в напівлогарифмічних координатах.

Швидкість корозії в технологічних середовищах визначається наявністю на поверхні металу катодного деполаризатора – кисню. Перемішування розчину, яке завжди супроводжує тертя, також сильно полегшує доступ кисню і виключає гальмування стадій корозійного процесу, пов'язаних з дифузією деполаризатора. Тому випробування проводились у спокійному середовищі та в умовах його інтенсивного перемішування.

При дослідженні кінетики електрохімічних реакцій визначали залежності між потенціалом електрода ϕ і густиною поляризуючого струму I , тобто будували поляризаційні i – ϕ криві. Екстраполяція прямолінійних (тафелевських) ділянок поляризаційних кривих дозволила отримати порівняльну оцінку швидкості корозії досліджуваних матеріалів [15].

4. 3. Методика визначення зносостійкості захисних покриттів

Випробування матеріалів на зносостійкість проводили за схемою торцевого тертя (рис. 2, 3). Процес тертя досліджувався в широкому діапазоні швидкостей і питомих навантажень на контактні тіла.

Для реалізації методу зачищення поверхонь металів під розчином [15] та співставлення потенціалів тертя й зачистки, проводили зношування поверхні металу абразивним кругом марки 24А25НСМ16К5Б (рис. 2) в розчині електроліту. Це дало змогу отримати інформацію про електрохімічну поведінку металу

чи захисного покриття і визначити їхню зносостійкість в умовах корозійно-абразивного зношування. Випробування на зношування проводили на серійній машині тертя СМЦ–2 і установці торцевого тертя (рис. 3).

Зношування нерухомого металевго зразка 1 з захисним покриттям здійснювали абразивним кругом (або металевим контртілом) 3, який обертався (рис. 2). Закріплений в пластмасовому корпусі зразок 1 притискувався з силою P до абразивного круга. Момент тертя вимірювався динамометром (на рисунку не показаний).

Технологічне середовище заливалося в посудину 5 з органічного скла. Вимірювання електродного потенціалу при зношуванні торцевої поверхні зразка проводилось відносно хлорсрібного електрода порівняння потенціостатом 6. Експерименти проводились при швидкості ковзання 0,8 м/с і питомому навантаженні 0,3 МПа.

Підготовка робочої поверхні зразків, зміцнених захисними покриттями, до експерименту полягала в припрацюванні торцевої поверхні до однорідного стану, який визначався візуально та зі стабілізації моменту тертя.

Величину зносу покриття визначали ваговим методом та методом лінійних вимірювань.

5. Результати досліджень властивостей досліджуваних покриттів

Дослідження кінетики електродних потенціалів вибраних покриттів дозволило встановити, що значення електродного потенціалу стабілізуються через 15...40 хвилин при перемішуванні модельного розчину дифузійного соку і через 60...240 хвилин при зануренні у середовище без перемішування.

Найбільш позитивний потенціал спостерігався у покриття 2 (–390 мВ). У покриттів 3 та 1 він був більш негативним (–460 та –490 мВ, відповідно) (табл. 2). Зазначена різниця у величині стаціонарного електродного потенціалу $\varphi_{ст}$ пояснюється відмінністю хімічного складу досліджуваних покриттів. Можуть також впливати умови нанесення захисних покриттів.

Таблиця 2

Значення електрохімічних характеристик і швидкостей корозії досліджуваних покриттів

№ Пок- риття	Покриття	Стаціонарний електродний потенціал, φ , В	Густина стру- му корозії, i_k , A/m^2	Швидкість корозії, V_k , $г/м^2 \cdot год$
1	ПН85ЮІ5	-0,49	0,0275	0,0278
2	ПН55Т45	-0,39	0,0199	0,0208
3	ПР-Н70ХІ7С4Р4	-0,46	0,0513	0,0535

Зняття поляризаційних анодних і катодних кривих здійснювалось в потенціодинамічному режимі. Аналіз отриманих кривих (рис. 4, криві 1–3) показав, що характер корозійної поведінки покриттів 1 і 3 приблизно однаковий, у той час як у покриття 2 є яскраво виражена пасивна область. Порівняння струмів корозії (табл. 2), визначених шляхом екстраполяції тафелевських ділянок поля-

ризаційних кривих, показало, що покриття 2 характеризується мінімальною густиною струму і відповідно корозійна стійкість його вища.

Відповідно до механізму дифузійної кінетики електрохімічних процесів, що протікають з кисневою деполяризацією, швидкість корозії пропорційна концентрації розчиненого в корозійному середовищі кисню. Перемішування розчину сприяє збільшенню концентрації кисню в приелектродному шарі, що призводить до збільшення швидкості корозії. Цим же пояснюється і більш швидке встановлення $\varphi_{ст}$ при збільшенні швидкості перемішування. В інтервалі швидкостей перемішування від 0,5 до 1 м/с спостерігалось лінійна залежність швидкості корозії від швидкості перемішування. Тобто коли буде досить висока концентрація кисню на поверхні зразка, тоді вона починає пасивуватися (див. рис.4, крива 2). Однак навіть при інтенсивному перемішуванні важкорозчинні сполуки екранують зародки корозії, що локалізуються в порах покриття, в результаті чого швидкість корозії з часом може знизитися.

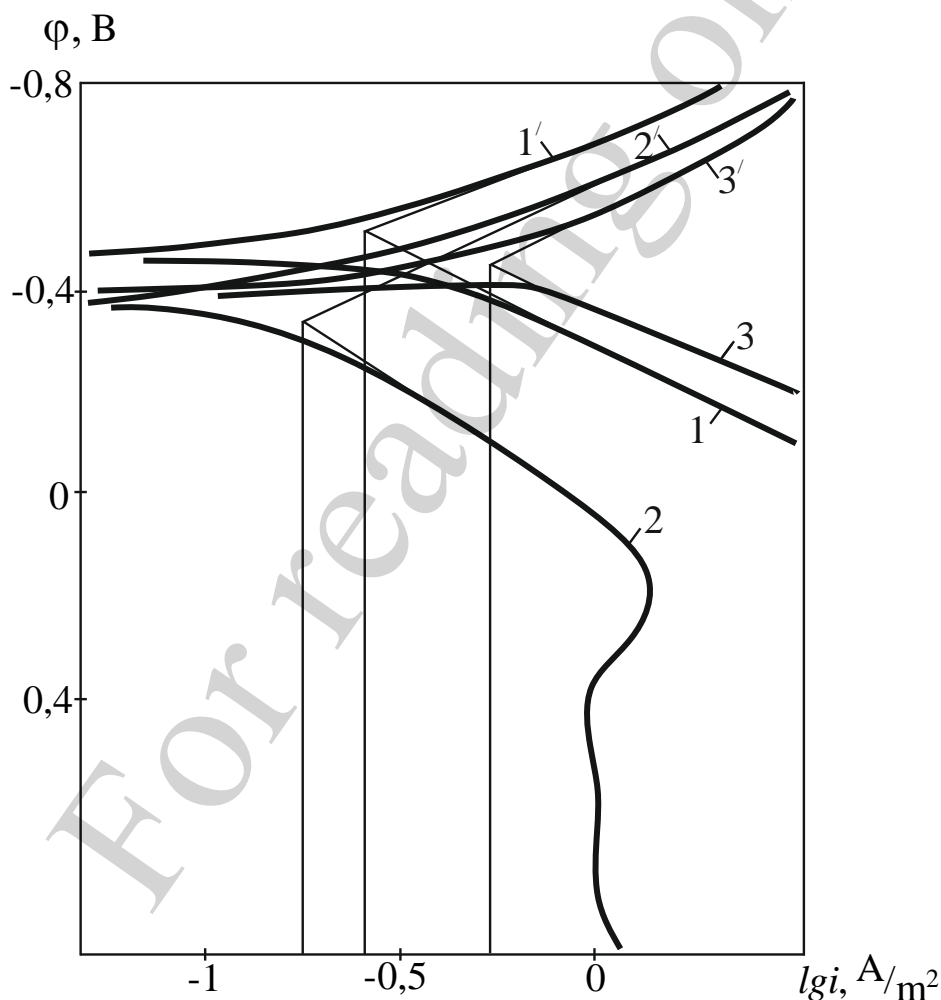


Рис. 4. Потенціодинамічні поляризаційні криві покриттів 1, 2, 3
(номери покриттів відповідають табл. 1)

Електрохімічними дослідженнями встановлено (табл. 2), що найменша швидкість корозії притаманна покриттю ПН55Т45, яке може бути використане

як корозійностійке в кислих розчинах цукрози, наприклад, для зміцнення шнеків дифузійних апаратів.

Відомо, що інтенсивність корозії металів істотно залежить від температури середовища [1, 5]. Робоча температура дифузійного соку бурякоцукрового виробництва коливається від 30 до 80 °С. Підвищення температури поверхонь тертя призводить до зменшення енергетичних витрат на процеси знеміцнення і руйнування [5, 8].

З підвищенням температури кислого середовища відбувалось зміщення електродного потенціалу поверхонь зразків в негативну сторону та збільшення струмів корозії. Це свідчить про збільшення швидкості корозії. Характерно, що вже при 40 °С на анодній поляризаційній кривій покриття 2 була відсутня пасивна область (рис. 4, крива 2).

Враховуючи, що дифузійний сік є багатокомпонентним корозійно-активним агентом, значний інтерес представляє вивчення впливу концентрації цукрози на корозійну стійкість металу. Цукроза, являючись основним компонентом дифузійного соку, може помітно впливати на його електрохімічні характеристики. Зокрема, цукроза впливає на рН соку, електропровідність, розчинність в ньому кисню.

Враховуючи підвищену корозійну стійкість досліджуваних покриттів та малу різницю між електрохімічними показниками під впливом концентрації розчиненої цукрози, за об'єкт досліджень було взято вуглецеву конструкційну сталь Ст5.

Результати досліджень, що представлені на рис. 5 показують, що істотний вплив на хід потенціометричної кривої проявляється лише за концентрації цукрози більше 10 відсотків. При цьому значення електродного потенціалу стабілізуються. Збільшення концентрації цукрози викликає пасивацію сталі, навіть при зміщенні потенціалів в область негативних значень.

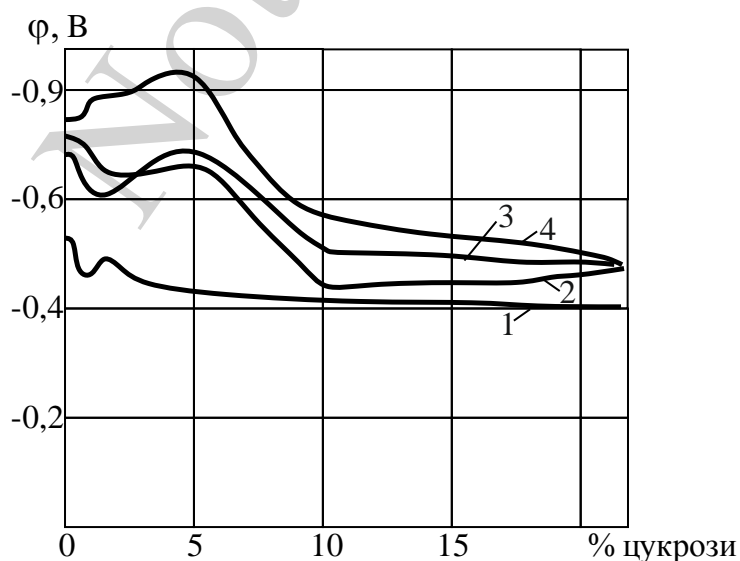


Рис. 5. Вплив концентрації цукрози на електродний потенціал ϕ сталі Ст 5 при витримці в розчинах: 1 – після занурення; 2 – після 1 доби витримки; 3 – після 2 діб витримки; 4 – після 4 діб витримки

Порівняння значень швидкості корозії сталі Ст 5 в модельному розчині дифузійного соку за різних концентрацій цукрози показали, що відбувається зменшення швидкості корозії, обумовлене, очевидно, зменшенням вмісту кисню в розчині, що є основним деполяризатором катодного процесу (табл. 3).

Таблиця 3

Значення швидкості корозії V_k сталі Ст 5 після 96 год експозиції в модельному розчині дифузійного соку

№ зразку	V_k , г/м ² ·год при концентрації цукрози, %				
	0	5	10	15	20
1	0,044	0,041	0,037	0,027	0,026
2	0,047	0,039	0,036	0,022	0,024
3	0,042	0,039	0,038	0,025	0,021

В результаті проведених експериментів щодо впливу концентрації цукрози на електропровідність розчину, було встановлено, що зі збільшенням концентрації знижується питома електропровідність розчину. Максимальна електропровідність спостерігалася у розчині рафінованого цукру з концентрацією близько 20 відсотків. Максимум електропровідності для розчинів, що містять цукрозу, може коливатися в широкому інтервалі густин розчинів і залежить від наявності органічних домішок.

Крім того, завдяки високим мастильним властивостям цукроза значно підвищує вантажопідйомність тертьової пари [5]. Тому, наявність цукрози в рідкому середовищі сприяє зменшенню інтенсивності зношування і коефіцієнта тертя матеріалів та підвищенню опору зчепленню пари тертя. Даний висновок підтверджується і результатами визначення швидкості корозії при терті: частка корозійного чинника, визначена за густиною корозійного струму, в загальному зносі досліджуваних покриттів зменшувалась.

Встановлено, що через 96 годин експозиції в модельному розчині дифузійного соку поверхня зразків покривається шаром продуктів корозії сіро-зеленого кольору, які мають досить сильну екрануючу дію і перешкоджають подальшому розвитку корозійних процесів. Плівка на поверхні розчиняється соляною кислотою і представляє, імовірно, фосфорно-кисле залізо. На екрануючі властивості утвореної плівки вказує те, що при періодичному видаленні плівки з поверхні зразків швидкість корозії збільшувалась і наближалася до швидкості розчинення металу в активному стані.

При терті металів в електроліті коефіцієнт тертя і знос залежать від наявності (або відсутності) адсорбційних або оксидних плівок, утворення яких визначається значенням електродного потенціалу. Однак електродний потенціал, будучи інтегральною характеристикою, відбиває не тільки зміну відносної площі цих плівок, а й якісні зміни електрохімічних процесів, які обумовлюють характер виникаючих при взаємодії двох тіл контактних явищ.

Дослідження зносостійкості вибраних покриттів в парі тертя з чавуном СЧ15 (ГОСТ 1412-85) показали (рис. 6), що зі збільшенням тиску на контакті інтенсивність зношування покриттів знижується. Винятком є покриття 1, у яко-

го при збільшенні навантаження від 1 до 2 Па інтенсивність зношування дещо збільшується (рис. 6, а, крива 1). Це можна пояснити збільшенням ролі механічного чинника в процесі тертя і уповільненим проявленням гідродинамічного ефекту.

Встановлено, що зі збільшенням швидкості ковзання від 0,15 до 0,35 м/с інтенсивність зношування всіх досліджуваних покриттів знижується. Це можна пояснити скороченням тривалості взаємодії окремих ділянок контакту поверхонь. Зменшується також час взаємодії корозійного середовища з ювенільними ділянками поверхонь. Частково проявляється гідродинамічний ефект. Зі збільшенням швидкості ковзання до 0,74 м/с термін взаємодії між ювенільними ділянками зменшується, що призводить до подальшого зниження інтенсивності зношування. Характерно, що при максимальній швидкості ковзання інтенсивність зношування всіх досліджуваних покриттів залишалася приблизно однаковою (рис. 6, в, крива 1-3). Очевидно відмінності в зносостійкості визначаються насамперед корозійною стійкістю, яка обумовлена різним хімічним складом.

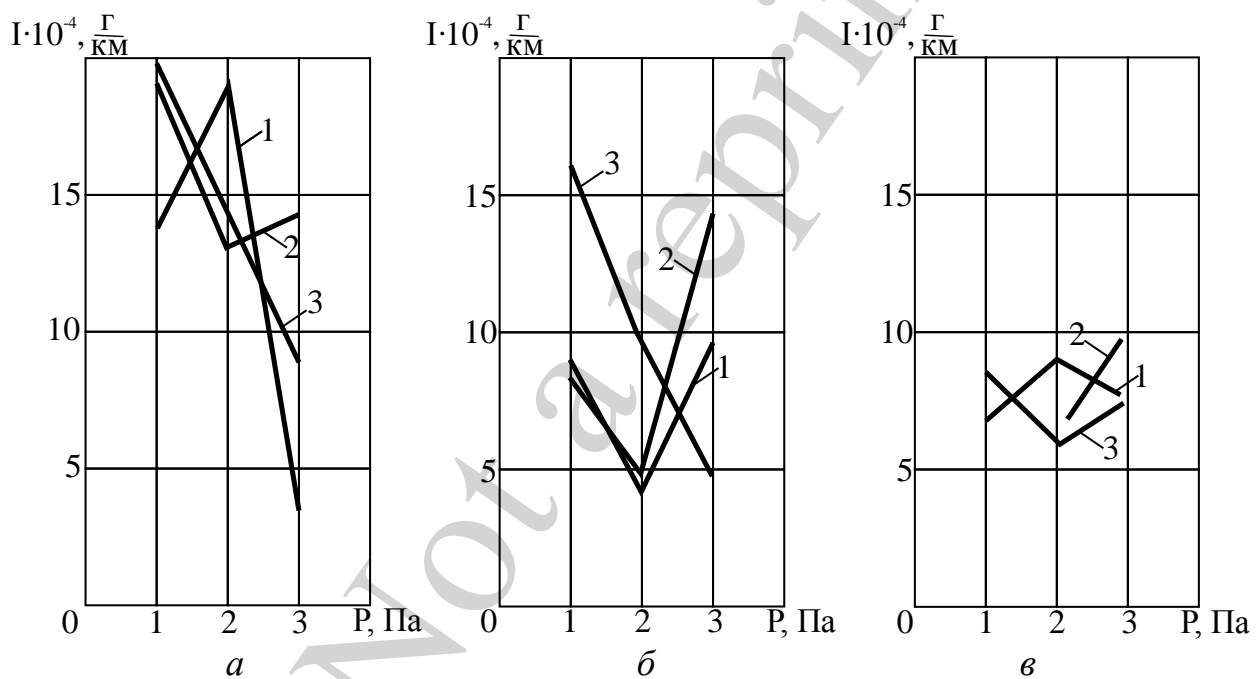


Рис. 6. Залежність інтенсивності зношування захисних покриттів в модельному розчині дифузійного соку від навантаження на контакт в парі тертя з чавуном СЧ-15 при терті зі швидкістю ковзання: а – 0,15 м/с; б – 0,35 м/с; в – 0,74 м/с (номери покриттів відповідають табл. 1)

Для всіх досліджуваних покриттів при швидкості ковзання 0,15 м/с коефіцієнт тертя в діапазоні розглянутих навантажень залишався практично постійним, що свідчить про пластичну деформацію нерівностей в місцях контакту. Процес тертя зразків при $V_{\text{ков}}=0,35$ і 0,74 м/с відбувається в режимі пластичної деформації. Деформація поверхонь тертя сприяє збільшенню площі фактичного контакту і розвитку адгезійних процесів. З ростом навантаження підвищується і коефіцієнт тертя.

Проведені також випробування зносостійкості валів з покриттями в парі з втулками із бронзи БрОЦС-5-5-5 (рис. 7) в модельному розчині дифузійного соку. Зі збільшенням навантаження на фрикційному контакті інтенсивність зношування покриття 1 збільшувалась, в той час як інтенсивність зношування покриттів 2 і 3 практично не змінювалась.

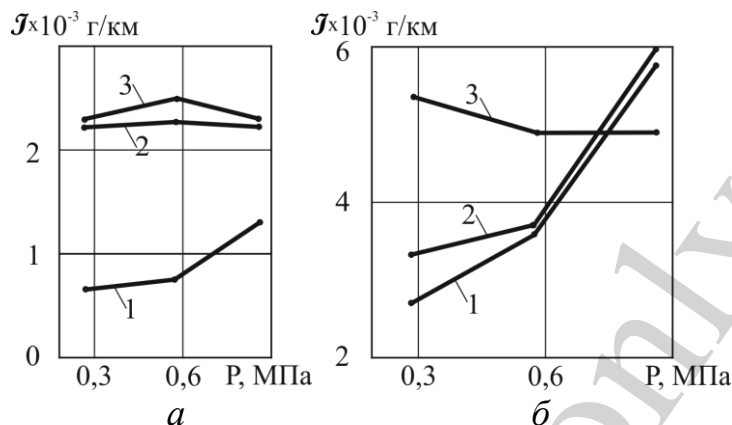


Рис. 7. Залежність інтенсивності зношення захисних покриттів в модельному розчині дифузійного соку від навантаження на контакті в парі тертя з бронзою БрОЦС-5-5-5 при терті зі швидкістю ковзання: *a* – 0,74; *б* – 1,0 м/с

Зі збільшенням швидкості ковзання від 0,74 до 1,0 м/с інтенсивність зношування покриттів 1 і 2 збільшується. При невеликих навантаженнях та швидкостях ковзання найбільшу зносостійкість має покриття 1. Але зі збільшенням навантаження та швидкості знос також різко збільшується. За максимальних навантажень та швидкості його знос перевищує знос покриття 3.

6. Обговорення результатів досліджень корозійно-механічного зношування матеріалів

Встановлені основні чинники, що впливають на стійкість матеріалів і покриттів. Ці результати досліджень можуть бути покладені в основу розробки методів прогнозування і забезпечення довговічності деталей дифузійних апаратів, що працюють в агресивних технологічних середовищах бурякоцукрових виробництв.

Дослідження (табл. 2 і рис. 4) показали, що всі розглянуті покриття в модельному розчині дифузійного соку бурякоцукрового виробництва мають достатньо високу корозійну стійкість. Про це свідчить мала густина струмів поляризації поблизу стаціонарних потенціалів в діапазоні $\pm 0,4\text{В}$.

В електрохімічній поведінці покриттів є відмінності. Найменша густина струму корозії при анодній поляризації була у захисного покриття 2 (табл. 2), а найбільша – у покриття 3. Інтенсивність корозійно-механічного зношування металів і захисних покриттів визначається їх складом і швидкістю протікання на поверхнях тертя електрохімічних процесів, які впливають на утворення і руйнування захисних плівок.

Руйнування поверхні металів і покриттів при терті в рідких корозійно-активних середовищах багато в чому визначаються фізико-хімічними властивостями вторинних структур, що утворилися та екранують поверхні тертя і захищають від пошкодження, виконують також функцію мастила. При ковзанні по оксиду руйнування, як правило, локалізується всередині нього і чим сильніше гальмують плівки анодний процес, тим вища його мастильна дія. При цьому потрібно зазначити, що поряд з важливістю механічних властивостей оксидних плівок не менш важлива роль належить в процесі корозійно-механічного зношування швидкості їх утворення та видалення.

В розчині цукрози зносостійкість покриттів визначається інгібуючою дією речовинита значно збільшує зносостійкість всіх досліджених захисних покриттів. Цукроза також знижує коефіцієнти тертя досліджуваних матеріалів. Треба відзначити, що цукроза – це слабка багатоосновна кислота з константою електролітичної дисоціації при 25°C рівною $3 \cdot 10^{-13}$. Тому можна припустити, що однією з причин уповільнення інтенсивності зношування матеріалів в розчині цукрози є уповільнення електрохімічних процесів, які при терті та зношуванні відіграють визначальну роль. Для розчинів цукрози характерні добрі змащувальні властивості, що дає можливість додатково навантажувати пару тертя.

Таким чином, на інтенсивність корозійно-механічного зношування поверхонь деталей в розчинах дифузійного соку впливає комплекс факторів: питома електропровідність розчину, наявність розчиненого кисню та концентрація цукрози.

Дифузійний сік і цукроза – це основні речовини бурякоцукрового виробництва. Тому визначені перспективні покриття для захисту деталей від корозійно-механічного зношування дадуть можливість підвищити довговічність великої номенклатури обладнання цукрових заводів. До такого обладнання відносяться, зокрема, дифузійні апарати, насоси, випарні апарати, бурякорізальні машини та ін.

Виконані дослідження є продовженням раніш виконаних досліджень [9, 15] стосовно впливу технологічних середовищ харчових виробництв на процеси корозійно-механічного зношування обладнання.

Дослідження будуть продовжені в частині застосування виробничих покриттів для захисту від корозійно-механічного зношування обладнання цукрових заводів.

Перевагами дослідження є врахування взаємодії технологічного середовища і захисних покриттів та відтворення реальних умов процесу тертя під час проведення експерименту. Це дало можливість правильно вибрати покриття для шнеків і опор ковзання, які зношуються з відмінною інтенсивністю і визначають рівень довговічності дифузійних апаратів.

У харчовій промисловості використовують велику кількість кислих технологічних середовищ, на які можна перенести отримані результати рН.

Разом з тим, промисловість випускає широку номенклатуру порошків, наприклад відомі безнікелеві порошки, які теж використовують для захисту деталей від корозійно-механічного зношування з одночасним підвищенням довгові-

чності зазначених деталей. Було б доцільно розширити обсяг досліджень для оцінки корозійно-механічної стійкості цих матеріалів.

7. Висновки

1. Встановлено, що величина і знак електродного потенціалу цих поверхонь та температури електроліту визначають можливість пасивування поверхонь тертя та інтенсивність корозійно-механічного спрацювання. З підвищенням температури дифузійного соку здатність поверхонь тертя матеріалів і покриттів до пасивації знижується. Збільшення концентрації цукрози в дифузійному соку призводить до пасивації поверхонь тертя деталей, підвищує вантажопідйомність опор ковзання і зменшує інтенсивність корозійно-механічного зношування.

2. Визначені триботехнічні характеристики і оцінена корозійна стійкість захисних плазмових покриттів для деталей дифузійних апаратів. Доведено, що зносостійкість металів і покриттів в значній мірі визначається електрохімічними процесами в зоні тертя. Показано, що всі випробувані покриття можуть бути використані для роботи в парі з підшипниками з чавуну СЧ15 (ГОСТ 1412-85) і бронзи БрОСЦ-5-5-5 (ГОСТ 613-79). Найвищу корозійну стійкість за значеннями електрохімічних характеристик і швидкостей корозії в умовах корозійно-механічного зношування мало покриття ПН55Т45. Найбільшу зносостійкість при невеликих навантаженнях та швидкостях ковзання мало покриття ПН85Ю15.

3. Всі випробувані покриття можна рекомендувати для роботи в кислих технологічних середовищах дифузійних апаратів. Зокрема, покриття ПН55Т45 можна використовувати для захисту корпусів і шнеків, а покриття ПН85Ю15 для зміцнення опор ковзання дифузійних апаратів.

Література

1. Роменский, Н. П. Повышение долговечности оборудования сахарных заводов [Текст] / Н. П. Роменский, Г. А. Прейс, В. К. Супрунчук. – Киев: Техника, 1978. – 135 с.
2. Bayer, G. Mechanical Wear Fundamentals and Testing [Teicer] [Text] / R. Bayer. – CRC Press, 2004. – 416 p. doi: 10.1201/9780203021798
3. Лазарев, Г. Е. Механизм коррозионно-механического изнашивания [Текст] / Г. Е. Лазарев // Трение и износ. – 1984. – № 4. – С. 740–743.
4. Лазарев, Г. Е. Особенности трения и изнашивания материалов в агрессивных средах [Текст] / Г. Е. Лазарев, Т. Д. Харламова, В. И. Верейкин // Трение и износ. – 1981. – № 1. – С. 43–52.
5. Сухенко, Ю. Г. Надійність і довговічність устаткування харчових і переробних виробництв [Текст]: підр. / Ю. Г. Сухенко, О. А. Литвиненко, В. Ю. Сухенко. – К.: НУХТ, 2010. – 547 с.
6. Сухенко, В. Ю. Зносостійкість евтектичних покриттів під впливом соляного розчину [Текст] / В. Ю. Сухенко, Ю. Г. Сухенко, Ю. І. Бойко, В. В. Мануїлов // Продовольча індустрія АПК. – 2013. – № 2. – С. 6–9.

7. Лазарев, Г. Е. Абразивное изнашивание стали 08X18H10T в условиях электрохимической поляризации [Текст] / Г. Е. Лазарев, И. Д. Розенфельд, Т. Л. Харламова // Физико-химическая механика материалов. – 1981. – № 2. – С. 41–45.
8. Супрунчук, В. К. Причины и характерные виды коррозионно-эрозионного разрушения оборудования сахарных заводов [Текст] / В. К. Супрунчук, В. Н. Щеголев, И. Н. Переверзева и др. // Труды ВНИИСП. – 1968. – Вып. XIV. – С. 248–264.
9. Сухенко, Ю. Г. Природа коррозионно-механического изнашивания оборудования пищевой и перерабатывающей промышленности [Текст] / Ю. Г. Сухенко, А. Г. Дзюб, В. Ю. Сухенко, В. В. Мануилов // MOTROL Commission of Motorization and Energetics in Agriculture. – 2014. – Vol. 16, Issue 3. – P. 90–95.
10. Круман, Б. Б. Коррозионно-механический износ оборудования [Текст] / Б. Б. Круман, В. А. Круницына. – М.: Машиностроение, 1968. – 104 с.
11. Diomidis, N. Tribocorrosion of stainless steel in sulfuric acid: Identification of corrosion-wear components and effect of contact area [Text] / N. Diomidis, J.-P. Celis, P. Ponthiaux, F. Wenger // Wear. – 2010. – Vol. 269, Issue 1-2. – P. 93–103. doi: 10.1016/j.wear.2010.03.010
12. Wood, R. J. K. Tribo-corrosion of coatings: a review [Text] / R. J. K. Wood // Journal of Physics D: Applied Physics. – 2007. – Vol. 40, Issue 18. – P. 5502–5521. doi: 10.1088/0022-3727/40/18/s10
13. Воробьева, Г. А. Коррозионная стойкость материалов в агрессивных средах химических производств [Текст]: справочник / Г. А. Воробьева. – М.: Химия, 1967. – 843 с.
14. Прейс, Г. А. О природе коррозионно-механического изнашивания металлов [Текст] / Г. А. Прейс // Трение и износ. – 1987. – Т. 8, № 5. – С. 792–797.
15. Дзюб, А. Г. Методика исследования процессов коррозионно-механического изнашивания оборудования пищевых и перерабатывающих производств [Текст] / А. Г. Дзюб, В. Ю. Сухенко, В. В. Мануилов, Ю. Г. Сухенко // MOTROL Commission of Motorization and Energetics in Agriculture. – 2014. – Vol. 16, Issue 3. – P. 74–81.